

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra energetiky

Separátor a přehřívač jaderné elektrárny MIR 1200

Separator and Preheater of Nuclear Power Plant
MIR 1200

Student: Aleš Richter

Vedoucí bakalářské práce: prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.

Ostrava 2011

Zadání bakalářské práce

Student: **Aleš Richter**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 3907R004 Provoz a řízení v energetice
Téma: **Separátor a přehřívač jaderné elektrárny MIR 1200**
Separator and Preheater of Nuclear Power Plant MIR 1200

Zásady pro vypracování:

Na základě rešerše literatury popište koncepci a funkci separátoru a přehřívače tlakovodní jaderné elektrárny MIR 1200 III+ generace. Proved'te zjednodušený tepelný výpočet a navrh'nete zjednodušené schéma.

Tepelný výkon jaderné elektrárny	3200 MWt
Tlak syté páry	7,00 MPa
Teplota chladiva v I. okruhu	298,2/328,9 °C
Tlak v I. okruhu	16,2 MPa
Parní výkon PG	1 602 t/hod
Teplota napájecí vody	225 °C

Seznam doporučené odborné literatury:


Radko Hejzlar : Stroje a zařízení jaderných elektráren. Díl 1 a 2. Vydavatelství ČVUT v Praze. 2005. ISBN 80-01-03190-X
Oldřich Mátal: Jaderné reaktory a jejich chlazení. Nakladatelství CERN VUT v Brně. 2001. ISBN 80-214-2028-6.
František Hezoučký: Základy teorie provozních režimů jaderných elektráren s tlakovodními reaktory. Vydavatelství ČVUT v Praze. 2005. ISBN 80-01-03324-4.


Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.**

Datum zadání: 17.12.2010
Datum odevzdání: 23.05.2011




prof. Ing. Dagmar Juchelková, Ph.D.
vedoucí katedry


prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 17. 5. 2011

..... *Abt Richler*
podpis studenta

Prohlašuji, že

- Jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě : 17.5.2011

Aleš Richter

.....
podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce:

Aleš Richter

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Bitov 79, Bitov, 74301

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

RICHTER, A. *Separátor a přehříváč jaderné elektrárny MIR 1200 : bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2011, 31 s. Vedoucí práce: Kolat, P.

Bakalářská práce se zabývá zařízením ze sekundárního okruhu jaderné elektrárny a tím je separátor-přehříváč. V úvodu práce jsou vysvětleny a shrnuty základní informace o tomto zařízení a proč je toto zařízení tak nezbytné. Následuje zjednodušený tepelný výpočet, který vychází ze zadaných parametrů pro MIR 1200. Z tepelného výpočtu se určí počet vlásenek hlavního a vedlejšího svazku přehříváče, neboť přehříváč se skládá celkem ze čtyř přehříváčů a každý z nich má ještě hlavní a vedlejší svazek. Posledním úkolem práce je nakreslit zjednodušené schéma celého zařízení.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

RICHTER, A. *Separator and Preheater of Nuclear Power Plant MIR 1200: Bachelor Thesis*. Ostrava : VŠB –Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Energetics, 2011, 31 p. Thesis head: Kolat, P.

Bachelor thesis is dealing with the appliance of the secondary circuit of nuclear power plant and that is the separator and preheater. The introduction explains and summarizes basic information about this device and says, why this device is so necessary in the nuclear power plant. Then follows a simplified thermal calculations, based on specific parameters for MIR 1200. In the next step is determined the number of pipes of primary and secondary bunch, because preheater consist of four preheaters. Each of them consist of primary and secondary bunch. The last part of this project is to draw simplified scheme of this device.

KLÍČOVÁ SLOVA: Separátor a přehříváč, MIR 1200, tepelný výpočet

KEYWORDS: Separator and preheater, MIR 1200, thermal calculations

Obsah

1.	Úvod	1
2.	Důvod separace páry.....	2
3.	Způsoby separace páry	2
3.1.	Pasivní způsob	2
3.2.	Aktivní způsob	2
4.	Vnější separace vlhkosti páry	3
4.1.	Síťové separátory	3
4.2.	Cyklonové separátory	4
4.3.	Žaluziové separátory	5
5.	Separátory a přehříváče páry	5
6.	Separátory a přehříváč pro VVER 1000	6
7.	Projekt MIR 1200.....	8
8.	Zjednodušený tepelný výpočet přehříváče páry	9
8.1.	Nadefinování hodnot pro výpočet	9
8.2.	Vlastní tepelný výpočet.....	9
8.3.	Energetická bilance přehříváku	23
8.4.	Výpis zdrojového kódu a výsledková tabulka z programu EES	24
9.	Závěr.....	26
10.	Seznam použité literatury	27
11.	Seznam příloh.....	28

Seznam použitých značek a indexů

Značka	Jednotka	Veličina
Nu_{hs}	[-]	Nuseltovo kritérium topné páry hlavního svazku
Nu_p	[-]	Nuseltovo kritérium přehřívání páry
Nu_{vs}	[-]	Nuseltovo kritérium topné páry vedlejšího svazku
Q_c	[W]	Celkový tepelný výkon přehříváku
$Q_{hs,p}$	[W]	Tepelný výkon hlavního svazku na straně přehřívání páry
$Q_{hs,t}$	[W]	Tepelný výkon hlavního svazku na straně topné páry
$Q_{vs,p}$	[W]	Tepelný výkon vedl. svazku na straně přehřívání páry
$Q_{vs,t}$	[W]	Tepelný výkon vedl. svazku na straně topné páry
Re_{hs}	[-]	Reynoldsovo kritérium topné páry hlavního svazku
Re_p	[-]	Reynoldsovo kritérium přehřívání páry
Re_{vs}	[-]	Reynoldsovo kritérium topné páry vedlejšího svazku
S_1	[m]	Vodorovná vzdálenost mezi vlásenkami
S_2	[m]	Svislá vzdálenost mezi vlásenkami
S_{hs}	[m ²]	Plocha vnějšího povrchu vláseň hlavního svazku
S_{sv}	[m ²]	Plocha svazku
S_{vs}	[m ²]	Plocha vnějšího povrchu vláseň vedlejšího svazku
d_1	[m]	Vnitřní průměr vláseň
d_2	[m]	Vnější průměr vláseň
d_n	[m]	Vnitřní průměr vláseň po zanesení vrstvou CaCO ₃
i_p	[J·kg ⁻¹]	Entalpie přehřívání páry
i_t	[J·kg ⁻¹]	Entalpie topné páry
k	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	Součinitel prostupu tepla
l_{hs}	[m]	Celková délka vláseň hlavního svazku
l_{min}	[m]	Minimální vzdálenost mezi vlásenkami
l_{vs}	[m]	Celková délka vláseň vedlejšího svazku
\dot{m}_p	[kg·s ⁻¹]	Hmotnostní průtok přehřívání páry
\dot{m}_t	[kg·s ⁻¹]	Hmotnostní průtok topné páry
n	[-]	Počet trubek
p_p	[Pa]	Tlak přehřívání páry
$p_{stř}$	[Pa]	Střední tlak páry
p_t	[Pa]	Tlak topné páry
$q_{stř,hs}$	[W·m ⁻²]	Střední měrný tepelný tok hlavního svazku
$q_{stř,vs}$	[W·m ⁻²]	Střední měrný tepelný tok vedlejšího svazku
t_p	[°C]	Teplota přehřívání páry
$t_{stř}$	[°C]	Střední teplota
t_t	[°C]	Teplota topné páry
$v_{stř,hs}$	[m ³ ·kg ⁻¹]	Střední měrný objem páry
w	[m·s ⁻¹]	Rychlost přehřívání páry
$w_{hs,t}$	[m·s ⁻¹]	Rychlost topné páry hlavního svazku

$w_{vs,t}$	$[m \cdot s^{-1}]$	Rychlost topné páry vedlejšího svazku
x_p	[-]	Suchost přehřívání páry
x_t	[-]	Suchost topné páry
z_{hs}	[-]	Počet vláseček hlavního svazku
z_{vs}	[-]	Počet vláseček vedlejšího svazku
α_{1hs}	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$	Součinitel přestupu tepla hlavního svazku
α_{1vs}	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$	Součinitel přestupu tepla vedlejšího svazku
α_2	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$	Součinitel přestupu tepla přehřívání páry
α_t	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$	Součinitel přestupu tepla topné páry
$\Delta t_{ln,hs}$	$[^{\circ}C]$	Střední logaritmický rozdíl teplot hlavního svazku
$\Delta t_{ln,vs}$	$[^{\circ}C]$	Střední logaritmický rozdíl teplot vedlejšího svazku
ε_i	[-]	Koeficient vyjadřující vliv 1. a 2. řady
ε_s	[-]	Koeficient vyjadřující vliv roztečí
λ_{CaCO_3}	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$	Tepelná vodivost vrstvy $CaCO_3$
λ_m	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$	Tepelná vodivost materiálu trubek

1. Úvod

S rozvojem vědy a techniky a vývojem civilizací na celém světě vzrůstá i spotřeba elektrické energie, proto se musí zvyšovat i její výroba.

V našem státu vyrábíme elektrickou energii především z fosilních paliv – černého, ale hlavně hnědého uhlí. Bohužel kvůli těžebním limitům je tato možnost výroby elektrické energie dosti omezená. Také solární, větrné a vodní elektrárny díky zeměpisným podmínkám u nás nemají moc velkou budoucnost. Tam, kde jsou podmínky alespoň trochu příznivé, už elektrárna stojí. Asi nejlepší možností pro výrobu elektrické energie, která se nám v dnešní době nabízí, je jaderná energetika. Samozřejmě i jaderná elektrárna, tak jako každá jiná, má své nevýhody – jaderný odpad, za to je šetrnější k životnímu prostředí, co se týče úniku škodlivých látek do ovzduší.

Na našem území stojí momentálně dvě jaderné elektrárny – Dukovany, kde jsou čtyři bloky o instalovaném elektrickém výkonu přes 1760 MW a Temelín, kde jsou 2 bloky o instalovaném elektrickém výkonu přes 2000 MW.

Uvažuje se o dostavbě dalších dvou bloků v jaderné elektrárně Temelín o instalovaném elektrickém výkonu 2x1200 MW. Měly by to být bloky typu MIR 1200, které navazují na evoluci tlakovodních reaktorů VVER-1000.

Tato práce se bude zabývat projektem MIR 1200, především jednou částí toho bloku a tou je separátor a přihřívač.

První částí práce je rešerše literatury, kde je vysvětleno, proč je separace a přihřev páry v jaderných elektrárnách tak důležitá. Na jednoduchých obrázcích je vysvětlena funkce základních typů separace. Nakonec rešerše je vysvětlena funkce separátoru a přihřívače SPP 1000, který se používá v jaderné elektrárně Temelín. Z tohoto separátoru a přihřívače bude vycházet i separátor pro MIR 1200. Ze zadaných vstupních hodnot pro MIR 1200 je vypočítán zjednodušeným tepelným výpočtem výkon přihřívače, z kterého je následně vypočítán počet vlásenek jednotlivých svazků přihřívače. Poslední částí bakalářské práce je zjednodušené schéma celého zařízení, které se nachází v příloze práce.

2. Důvod separace páry

V jaderných elektrárnách bývají turbíny pracující se sytou párou. U tlakovodních reaktorů je tlak vstupní páry okolo 4,3 až 7 MPa. Tomuto tlaku odpovídá teplota sytosti 254,6 až 286,7 °C. Při expanzi páry ve vysokotlakém stupni turbíny se pára dostává do oblasti mokré páry – zvyšuje se vlhkost (snižuje se její suchost X). Při překročení vlhkosti 13 – 14%, klesá termodynamická účinnost tohoto stupně. Pára se musí před vstupem do dalšího stupně turbíny (nízkotlakého) zbavit vlhkosti a přehřát, abychom ji znovu dostali na stav sytosti. Toto se provádí ve speciálním zařízení - separátoru – přehříváči.

Dalším důvodem separace páry je prodloužení životnosti turbíny. Mokrá pára je daleko agresivnější na povrch lopatek turbíny a dochází k erozi.

3. Způsoby separace páry

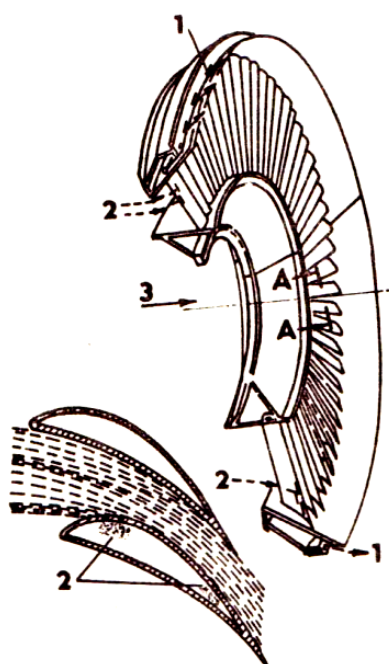
3.1. Pasivní způsob

Pasivní způsoby separace mají za úkol zvýšit odolnost povrchu turbíny, především lopatek proti erozi. Lopatky jsou jednou z nejdražších částí turbíny, proto je snaha vytvořit co nejodolnější povrch. Mezi nejčastější úpravy patří ochrana vstupní hrany pomocí elektrojiskrového nanesení ochranné vrstvy slitiny karbidu chromu a niklu. Dalším způsobem je připájení satelitových destiček pomocí elektrického ohřevu stříbrné pájky. Tyto destičky mívají tloušťku přibližně 1,5 až 2 mm. Tento způsob se však nesmí používat u turbín, které pracují s radioaktivní párou, protože vzniká zářič s poločasem rozpadu 5,26 roků. Posledním nejběžnějším způsobem pasivních prostředků je povrchové kalení lopatek. To se provádí také na vstupních hranách lopatek a to v horní třetině jejich délky. Nevýhodou je, že se zároveň snižuje mez únavy základního materiálu. Nejvyšší odolnost proti korozi má již zmíněné připájení satelitových destiček, nižší pak kalený povrch a nejnižší elektrojiskrově nanesená vrstva. Naopak, co se týče zmenšení meze únavy materiálu, velikostí vnitřních pnutí a deformace lopatky, je na tom elektrojiskrové nanášení materiálů nejlépe. Tento způsob je také technologicky nejméně náročný. Kvůli provozní spolehlivosti se dává přednost spíše aktivním způsobům.

3.2. Aktivní způsob

Aktivní způsoby separace mají za úkol snížit obsah vody v parním proudu. Máme několik způsobů, jak vlhkost z páry odloučit, například odváděním vody za oběžnými a rozváděcími lopatkami turbíny. Voda je odstředivou silou odtlačována k obvodu, kde se odebírá. U rozváděcích lopatek je možno odsávat vlhkost na jejich vyduté části v blízkosti výstupních hran štěrbinami napojenými na dutinu lopatky

(obr. 3.1). Experimenty bylo zjištěno, že štěrby na odvod vlhkosti nemají vliv na energetické ztráty. U koncových stupňů turbíny se provádí vytápění duté rozváděcí lopatky. Lopatka se vytápí parou z regeneračního odběru. Regenerační odběry slouží také k současnému odvodu vlhkosti. Vlhkost můžeme také částečně odloučit předřazením nepohyblivé lopatkové mříže (tzv. vnitřního separátoru). Díky této lopatkové mřížce se proudící pára uvede do rotace a odstředí se vlhkost ještě před vstupem páry do dalšího stupně turbíny. V jaderné energetice se ale nejčastěji používají vnější separátory, ty nejsou na rozdíl od vnitřních separátorů součástí turbíny, ale jsou umístěny vedle. Pára se po expanzi ve vysokotlaké části turbíny vyvede do separátoru, kde se vlhkost odloučí a pára se většinou ještě přehřeje a pokračuje do nízkotlaké části turbíny.

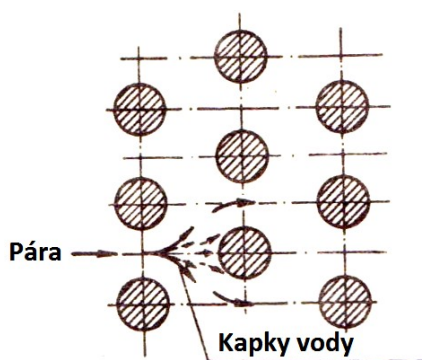


Obr. 3.1 Konstrukce rozváděcích lopatek[3]

- 1 – odsávání
- 2 – štěrby na povrchu lopatek
- 3 – směr proudu páry

4. Vnější separace vlhkosti páry

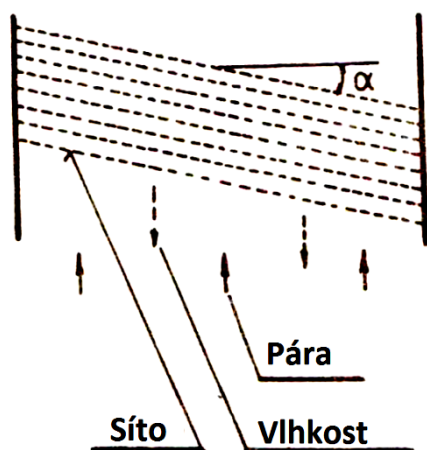
4.1. Síťové separátory



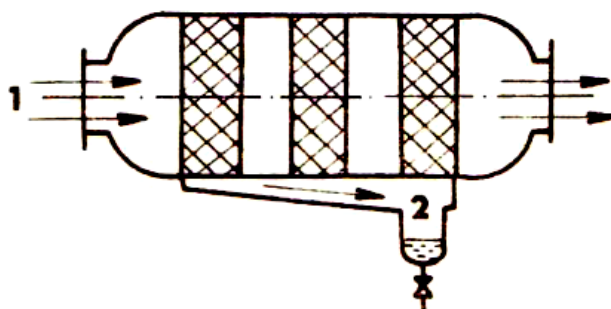
Obr. 4.1 Odlučování vlhkosti na sítu[1]

Hlavním prvkem těchto odlučovačů je síto tvořené válcovými profily uspořádanými do šachovnice (obr. 4.1). Čím je menší průměr válcového profilu, tím dochází k většímu odloučení. Průměr drátů bývá 0,3 až 0,5 mm. Tyto dráty mohou být vodorovné nebo mohou mít malý sklon – maximálně 15° (obr. 4.2). V celém separátoru bývá těchto sítí řazených za sebou více. Mokrá pára

proudí přes tato síta, kde se kapky vody zachytí a tíhovou silou odkapávají dolů. Aby odkapávané kapky nebyly znovu unášeny proudem, musí být rychlost páry poměrně malá 1 až 2 m.s⁻¹. Abychom docílili malých rychlostí, musí být rozměry separátorů poměrně velké. Síťové separátory mohou být vertikální nebo horizontální (obr. 4.3). Tlaková ztráta (odpor) odlučováků je velice malá a výstupní pára má vlhkost 0,1 až 0,2%.



Obr. 4.2 Princip odlučování vlhkosti na sítu[1]

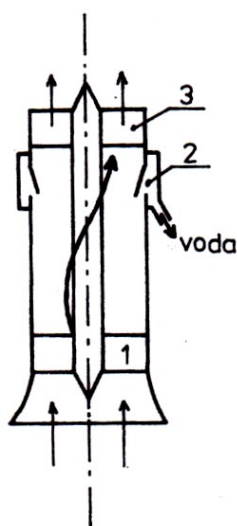


Obr. 4.3 Schéma síťového separátoru[1]

- 1 – směr proudu páry
2 – odvod kondenzátu

4.2. Cyklonové separátory

U cyklonových separátorů je vstupující mokrá pára uvedena do rotace specifickým tvarem nepohyblivých lopatek umístěných na vstupu do odlučováku. Odstředivou silou se těžší kapičky dostanou na obvod tohoto cyklonového odlučováku, kde jsou štěrbinami odvedeny. Lehčí pára pak pokračuje ve směru osy cyklonu (obr. 4.4). Cyklonové odlučováky však mají značnou tlakovou ztrátu a pára na výstupu dosahuje vlhkosti okolo 1%.

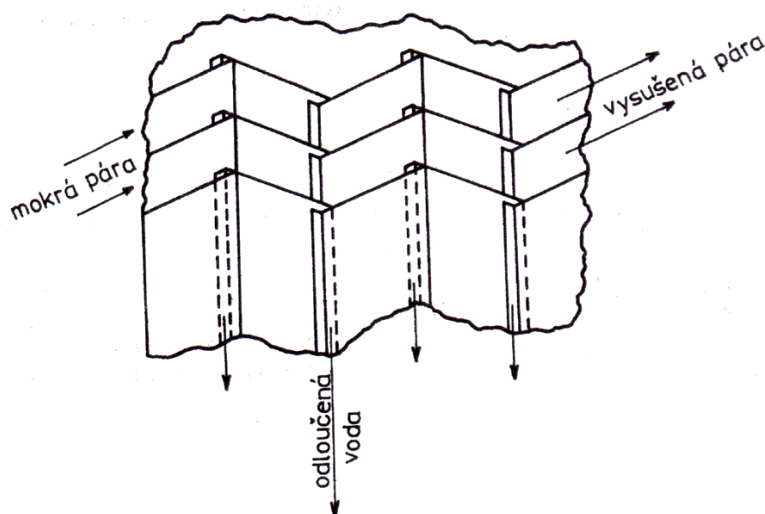


Obr. 4.4 Princip odlučování vlhkosti na sítu[1]

- 1 – nepohyblivé lopatky
2 – štěrbinu pro odvod vody
3 – výstupní lopatky

4.3. Žaluziové separátory

Žaluziový odlučovač je tvořen vertikálně orientovanými vlnitými plechy tzv. žaluziemi. Maximální sklon může být 30° . Mokrá pára protéká žaluziemi vodorovně s lehkými výchylkami směru. Při těchto výchylkách dochází k odloučení vody, která na plechových žaluziích vytváří vodní film, který po nich stéká svisle dolů (viz obr. 4.5). Tyto odlučovačky nejsou tak citlivé na změnu rychlostí proudící páry, jen by tato rychlost neměla překročit určitou kritickou rychlost, při které by už docházelo k trhání vodního filmu a kapky vody by se opět dostávaly do proudu páry, kterým by byly unášeny. Výsledná vlhkost páry, která prošla tímto odlučovákem je 0,4%.



Obr. 4.5 Princip žaluziového separátoru[1]

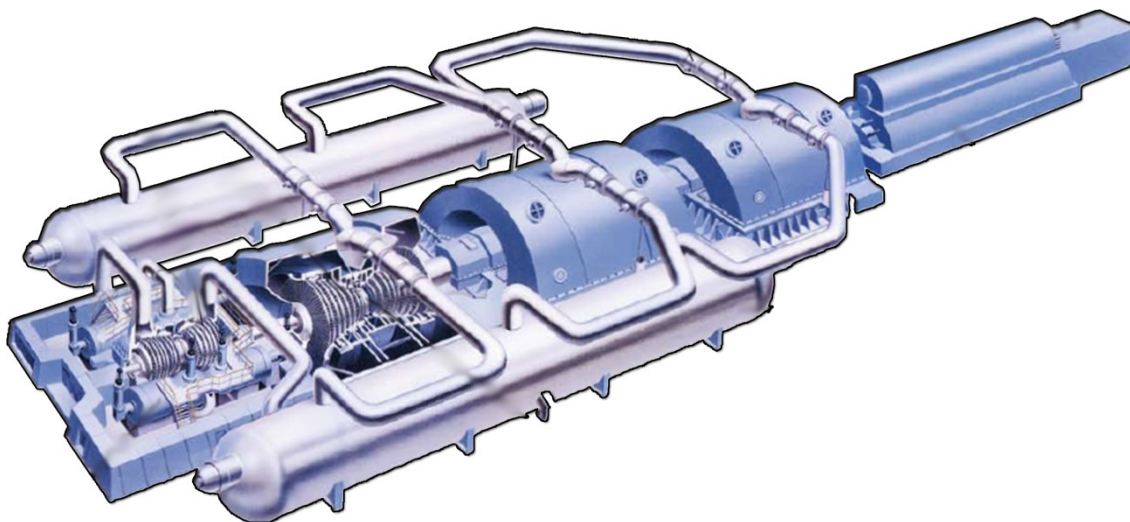
5. Separátory a přehříváče páry

V jaderných elektrárnách, kde turbíny pracují se sytou párou, se používají separátory spojené s přehříváči páry, aby se zvýšila celková termodynamická účinnost cyklu. Síťové a žaluziové separátory se umísťují do válcových nádob, ve kterých nám zbývá ještě relativně dost prostoru pro umístění přehříváčů páry. Přehříváč má větší tlakovou ztrátu (odpor), čehož se využívá ke zrovnoměnění proudění po celé ploše separátoru. Mokrá pára po expanzi ve vysokotlaké části turbíny proudí nejprve do systému separujících komor, které se nacházejí ve spodní části separátoru – přehříváče, kde dochází k odloučení vlhkosti z páry a odvodu do ohříváče vody. Pára pokračuje do vrchní části, kde probíhá další oddělování vlhkosti. Tato vlhkost se usazuje na povrchu speciálního systému sít nebo žaluzií. Pára odloučená od vlhkosti se přehřívá ostrou parou nebo parou z neregulovaného odběru v tzv. přehříváčích. Tyto přehříváče jsou trubkové svazky, ve kterých kondenzuje ostrá pára. Proto musí tímto systémem trubek procházet větší množství páry tak, aby nestihla pára zkondenzovat.

Musí být zaručena ventilace trubek. Trubky jsou vyráběny především ze slitiny mědi a niklu, a to v poměru 70:30 až 90:10, méně se používají ocelové, protože jsou náchylnější na korozi. Při dosušování páry dochází ke zvýšené koncentraci iontů chlóru, které spolu s kyslíkem způsobují korozi i austenitických ocelí.

6. Separátory a přehříváč pro VVER 1000

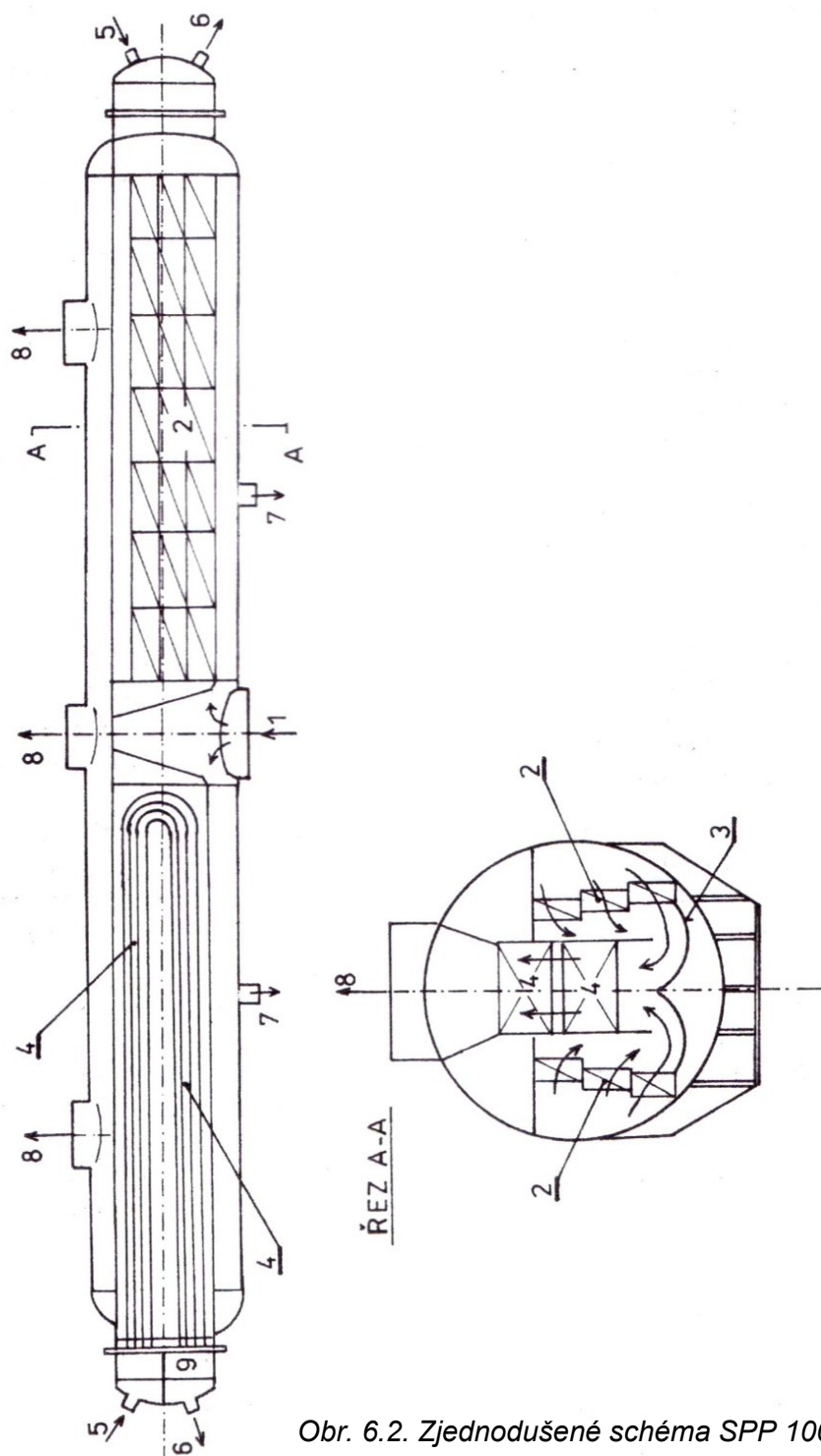
Bývá označován jako SPP 1000 – separátor – přehříváč páry. Těmito separátory je vybavena jaderná elektrárna Temelín – první a druhý blok. SPP 1000 má válcový tvar o délce 32 metrů a o průměru 3,5 metru. Pro každou 1000 MW turbínu jsou určeny 2 tyto separátory. Jsou to separátory vodorovného typu a jsou umístěny rovnoběžně s osou turbíny po její levé a pravé straně (obr. 6.1.).



Obr. 6.1. Umístění SPP 1000

Na (obr. 6.2.) je nakresleno zjednodušené schéma SPP 1000. Mokrá pára po expanzi ve vysokotlaké části turbíny vstupuje hrdlem (1), které se nachází uprostřed válcové nádoby. Celý separátor – přehříváč je souměrný podle roviny vedoucí osou vstupního hrdla (1), kolmé k podélné ose válcové nádoby. Přivedená mokrá pára se rozdělí na dvě strany celkem na čtyři proudy (dva na každou stranu). Nejprve prochází systémem žaluziových odlučováků (2), který je umístěn ve třech patrech nad sebou. Po průchodu těmito odlučováky se pára vede speciálně upravenými plechy (3) do trubkového přehříváku páry (4). Tento přehřívák se skládá z trubek tvarovaných do „U“, které jsou vytápěny ostrou parou přiváděnou hrdly (5). Tato pára však v trubkách kondenzuje, proto její kondenzát je odváděn hrdly (6). Odloučená voda z mokré páry v žaluziovém odlučováku se odvádí hrdly (7). Separovaná pára, která prochází trubkovým přehříváčkem (4) se ohřeje přibližně o 80 K. Po přehřátí se pára odvádí hrdly (8) do nízkotlakého stupně turbíny. Při kondenzaci topné páry vznikají v trubkách přehříváku tzv. vodní zátky, které mezi sebou uzavírají parní bubliny a to má za

následek nepříjemný pulsující charakter proudění. Aby k tomuto nedocházelo, tak se přibližně 30% nezkondenzované páry odvádí do výstupní komory (9) trubkového svazku. Následně se zavede do vedlejšího přehřívákového svazku, který je ve spodní části, pod hlavním přehřívákovým svazkem. Kondenzát topné páry z hlavního i pomocného přehříváku odvádí samospádem do sběrače kondenzátu. (Na obr. 7.2 není pro zjednodušení zakreslen). Tepelný výkon obou separátorů – přehříváčů, které připadají jedné turbíně, činí dohromady 230 MW tepelných a celková teplosměnná plocha je 7520 m². Tlak mokré páry na vstupu do SPP 1000 je 0,79 MPa.



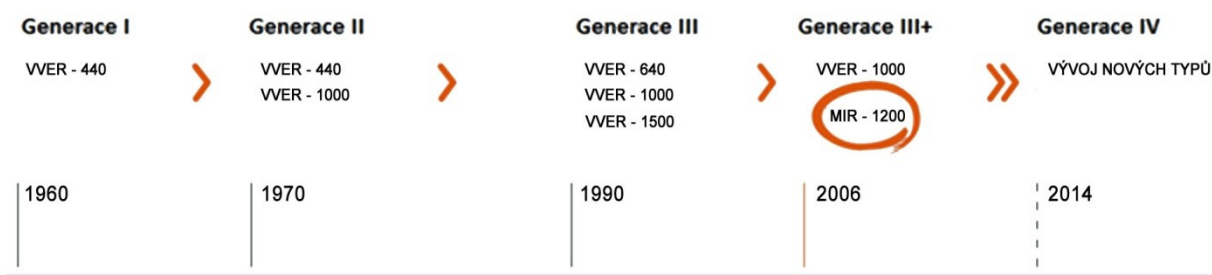
Obr. 6.2. Zjednodušené schéma SPP 1000 [1]

7. Projekt MIR 1200

Zkratka MIR – Modernized International Reactor – v překladu zmodernizovaný mezinárodní reaktor. Tento projekt nabízí konsorcium firem ŠKODA JS a.s., Atomstrojexport a. s. a OKB Gidropress a.s., které navazují na vývoj tlakovodních reaktorů PWR (pressurized water reactor) II. a III. generace, mezi které patří například VVER-440, VVER-640 a VVER-1000. U nás v České republice máme čtyři bloky VVER-440 v Dukovanech a dva bloky VVER-1000 v jaderné elektrárně Temelín. Pokud by již zmíněné konsorcium firem vyhrálo boj o dostavbu třetího a čtvrtého bloku v Temelínu, byl by zde použit právě koncept MIR-1200, který je již III⁺. generace.

Tato generace především dbá na bezpečnostní stránku při haváriích a neočekávaných vnějších vlivech. Kontejnment – ochranná obálka reaktoru a celého primárního okruhu je dimenzována například na pád letadla, zátěž od sněhu 4,3 kPa, zemětřesení 0,25 g, uragán, vnější výbuch nebo záplavy. Je vybavena systémem na likvidaci vodíku v hermetické obálce, systémem zachytu taveniny, systémem pasivního chlazení kontejnmentu, systémem pasivního chlazení parogenerátorů a dalšími.

Hlavní myšlenkou je však zapojení českých a slovenských firem do tohoto projektu. Při plném rozjetí projektu by se zapojilo cca 4000 až 5000 pracovníků, což by se projevilo velice kladně na nezaměstnanosti. Také by se posílila výuka jaderné energetiky a techniky celkově na vysokých školách. Veškerá zařízení se dají vyrobit ve vysoké kvalitě u nás. Může být použita česká turbína značky ŠKODA POWER a.s., která odpovídá nejmodernějším koncepcím. Dále by mohly být zapojeny do projektu tyto naše firmy: ŠKODA JS a.s., Vítkovice, Modřanská potrubní, SES Tlmače, ZVVZ Milevsko, PPA Bratislava, ZAT Příbram a jiné.



Obr. 7.1 Schéma vývoje tlakovodních reaktorů[8]

8. Zjednodušený tepelný výpočet přehříváče páry

8.1. Nadefinování hodnot pro výpočet

Zadané hodnoty pro VVER (MIR 1200):

Hodnoty na vstupu do přehříváče na straně přehřívané páry:

- tlak přehřívané páry: $p_{p1} = 0,6 \text{ [MPa]}$
- suchost přehřívané páry: $X_{p1} = 0,99[-]$
- množství přehřívané páry: $\dot{m}_{p1} = 1080 \text{ [kg} \cdot \text{s}^{-1}]$

Hodnoty na vstupu do přehříváče na straně topné páry:

- množství topné páry: $\dot{m}_{t1} = 130 \text{ [kg} \cdot \text{s}^{-1}]$
- tlak topné páry: $p_{t1} = 5,69 \text{ [MPa]}$

8.2. Vlastní tepelný výpočet

Určení ostatních hodnot potřebných pro výpočet:

- Hmotnostní tok přehřívané páry se při přechodu přes přehříváč nemění:

$$\dot{m}_{p1} = \dot{m}_{p2} = \dot{m}_{p3} = 1080 \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (1)$$

- Hmotnostní tok topné páry vystupující z hlavního svazku:
 - Podle literatury [1] je toto množství okolo 30% pro VVER1000, z této hodnoty budu vycházet také pro návrh SPP pro MIR 1200.

$$\dot{m}_{t3} = 0,3 \cdot \dot{m}_{t1} \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (2)$$

$$\dot{m}_{t3} = 0,3 \cdot 130$$

$$\dot{m}_{t3} = 39 \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$$

- Hmotnostní tok kondenzátu vystupujícího z hlavního svazku:

$$\dot{m}_{t3} = 0,7 \cdot \dot{m}_{t1} \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (3)$$

$$\dot{m}_{t3} = 0,7 \cdot 130$$

$$\dot{m}_{t3} = 91 \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$$

- Hmotnostní tok kondenzátu vystupujícího z pomocného svazku:

$$\dot{m}_{t4} = \dot{m}_{t3} = 39 \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (4)$$

- Teplota vstupující přehřívané páry do vedlejšího svazku:

- Určím pomocí softwaru EES z tlaku p_{p1} a suchosti X_{p1}

$$t_{p1} = 158,8 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (5)$$

- Teplota vystupující přehřáté páry z přehříváče:

- Tato teplota určena maximální přípustnou teplotou páry, kterou snese nízkotlaký díl turbíny. Volím teplotu jako pro VVER 1000, o něco málo vyšší.

$$t_{p3} = 260 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (6)$$

- Teplota vstupující topné páry do hlavního svazku:

- Určím pomocí softwaru EES z tlaku p_{t1} a suchosti $X_{t1} = 1$ [-]

$$t_{t1} = 272,1 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (7)$$

- Teplota kondenzátu topné páry vystupujícího z hlavního svazku:

- Podle literatury [3] se tato teplota volí o 10 – 15 °C nižší než teplota t_{t1} . Volím teplotu nižší o 10 °C.

$$t_{t2} = 262,1 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (8)$$

- Teplota páry vstupující z hlavního do vedlejšího svazku:

- Vlivem přirozené cirkulace je tato teplota stejná jako teplota kondenzátu t_{t2} .

$$t_{t3} = 262,1 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (9)$$

- Teplota kondenzátu topné páry vystupující z vedlejšího svazku:

- Volím teplotu stejnou jako t_{t3} .

$$t_{t4} = 262,1 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (10)$$

- Tlak přehřívané páry se při přechodu přes přehříváč nemění:

- Zanedbávám malou tlakovou ztrátu zařízení, protože nemá velký vliv na změnu entalpie.

$$p_{p1} = p_{p2} = p_{p3} = 0,6 \quad [\text{Mpa}] \quad (11)$$

- Tlak kondenzátu vystupujícího z hlavního svazku:

- Určím pomocí softwaru EES z teploty t_{t2} a suchosti $X_{t2} = 0$ [-]

$$p_{t2} = 4,854 \quad [\text{Mpa}] \quad (12)$$

- Tlak topné páry vystupující z hlavního svazku:
 - Stejný jako tlak p_{t2} .

$$p_{t3} = 4,854 \quad [\text{Mpa}] \quad (13)$$

- Entalpie přehřívání páry vstupující do přehříváče:
 - Určím pomocí softwaru EES z tlaku p_{p1} a suchosti X_{p1}

$$i_{p1} = 2735 \quad [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (14)$$

- Entalpie přehřívání páry vystupující z přehříváče:
 - Určím pomocí softwaru EES z tlaku p_{p3} a suchosti $X_{p3} = X_{p1}$

$$i_{p3} = 2979 \quad [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (15)$$

- Entalpie topné páry vstupující do hlavního svazku:
 - Určím pomocí softwaru EES z teploty t_{t1} a suchosti $X_{t1} = 1$ [-]

$$i_{t1} = 2788 \quad [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (16)$$

- Entalpie výstupního kondenzátu vstupujícího z vedlejšího svazku:
 - Určím pomocí softwaru EES z teploty t_{t4} a doporučené suchosti $X_{t4} = 0,03$ [-] podle literatury [1]

$$i_{t4} = 1195 \quad [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (17)$$

- Entalpie topné páry vstupující do vedlejšího svazku:
 - Určím pomocí softwaru EES z teploty t_{t3} a suchosti volím $X_{t3} = 0,81$ [-] podle literatury tak, aby byla zachována optimální rychlost páry.

$$i_{t3} = 2482 \quad [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (18)$$

Stanovení tepelného výkonu přehříváku:

- Celkový tepelný výkon na straně ohřívání páry:

$$Q_c = \dot{m}_{p1} \cdot (i_{p3} - i_{p1}) \quad [\text{W}] \quad (19)$$

$$Q_c = 1080 \cdot (2979 - 2735)$$

$$Q_c = 263520 \quad [\text{kW}]$$

- Tepelný výkon vedlejšího svazku na straně topné páry:

$$Q_{vs,t} = \dot{m}_{t3} \cdot (i_{t3} - i_{t4}) \quad [\text{W}] \quad (20)$$

$$Q_{vs,t} = 39 \cdot (2482 - 1195)$$

$$Q_{vs,t} = 50193 \quad [\text{kW}]$$

- Tepelný výkon hlavního svazku na straně topné páry:

$$Q_{hs,t} = Q_c - Q_{vs,t} \quad [\text{W}] \quad (21)$$

$$Q_{hs,t} = 263520 - 50193$$

$$Q_{hs,t} = 213327 \quad [\text{kW}]$$

Dopočet zbývajících entalpií:

- Entalpie přehřívání páry vystupující z vedlejšího svazku:
 - Při zanedbání ztrát tepla do okolí musí platit, že tepelný výkon vedlejšího svazku se musí rovnat tepelnému výkonu na straně přehřívání páry:

$$Q_{vs,t} = Q_{vs,p} \quad [\text{W}] \quad (22)$$

$$Q_{vs,p} = \dot{m}_{p1} \cdot (i_{p2} - i_{p1}) \quad [\text{W}] \quad (23)$$

$$i_{p2} = \frac{Q_{vs,p}}{\dot{m}_{p1}} + i_{p1} \quad [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (24)$$

$$i_{p2} = \frac{50193}{1080} + 2735$$

$$i_{p2} = 2781 \quad [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$$

- Entalpie topné páry vystupující z hlavního svazku:
 - Vycházím z tepelného výkonu hlavního svazku:

$$Q_{hs,t} = \dot{m}_{t1} \cdot (i_{t1} - i_{t11}) \quad [\text{W}] \quad (25)$$

$$i_{t11} = -\frac{Q_{hs,t}}{\dot{m}_{t1}} + i_{t1} \quad [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (26)$$

$$i_{t11} = -\frac{213327}{130} + 2788$$

$$i_{t11} = 1147 \quad [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$$

Výpočet rychlosti proudění a určení druhu proudění:

- Volím materiál, který byl zvolen pro SPP 1000 v Temelínu po výměně svazku roku 2005.

konstanty konstrukčního materiálu TR KR 16x1,3 – 17248.4:

- výpočtová teplota $300 [^{\circ}\text{C}]$
- tlaková zkouška pevnosti $13,2 [\text{MPa}]$
- vnitřní průměr trubky $d_1 = 0,0134 [\text{m}]$
- vnější průměr trubky $d_2 = 0,016 [\text{m}]$
- tepelná vodivost $\lambda_m = 36 [\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$

- Výpočet střední rychlosti proudění topné páry v trubkách hlavního svazku:
 - rychlost média $w_{hs,t} = 5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ volím podle doporučení z literatury [5]
 - Určím si pomocí softwaru EES z teploty t_{t1} a suchosti X_{t1} měrný objem syté páry, následně podle teploty t_{t2} a suchosti X_{t2} měrný objem syté kapaliny. Z těchto hodnot určím střední měrný objem hlavního svazku $v_{stř,hs} [\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$.

$$v_{stř,hs} = 0,017826 \quad [\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (27)$$

$$w_{hs,t} = \frac{\dot{m}_{t1} \cdot v_{stř,hs} \cdot 4}{n \cdot \pi \cdot d_1^2} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (28)$$

$$n = \frac{\dot{m}_{t1} \cdot v_{stř,hs} \cdot 4}{\pi \cdot w_{hs,t} \cdot d_1^2} \quad [-] \quad (29)$$

$$n = \frac{130 \cdot 0,017826 \cdot 4}{\pi \cdot 5 \cdot 0,0134^2}$$

$$n \cong 3300 \quad [-]$$

- Výpočet střední rychlosti proudění topné páry v trubkách vedlejšího svazku:
 - rychlost média $w_{hs,t} = 5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ volím podle doporučení z literatury [5]
 - Určím si pomocí softwaru EES z teploty t_{t3} a suchosti X_{t3} měrný objem syté páry, následně podle teploty t_{t4} a suchosti X_{t4} měrný objem syté kapaliny. Z těchto hodnot určím střední měrný objem hlavního svazku $v_{stř,vs} [\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$.

$$v_{stř,vs} = 0,017837 \quad [\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (30)$$

$$w_{vs,t} = \frac{\dot{m}_{t3} \cdot v_{stř,vs} \cdot 4}{n \cdot \pi \cdot d_1^2} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (31)$$

$$n = \frac{\dot{m}_{t3} \cdot v_{stř,vs} \cdot 4}{\pi \cdot w_{vs,t} \cdot d_1^2} \quad [-] \quad (32)$$

$$n = \frac{39 \cdot 0,017837 \cdot 4}{\pi \cdot 5 \cdot 0,0134^2}$$

$$n \cong 1000 \quad [-]$$

- stanovení středního tlaku a teploty pro topnou páru hlavního svazku:

$$p_{stř} = \frac{p_{t1} + p_{t3}}{2} \quad [\text{Pa}] \quad (33)$$

$$p_{stř} = \frac{5,69 + 5,578}{2}$$

$$p_{stř} = 5,634 \quad [\text{MPa}]$$

$$t_{stř} = \frac{t_{t1} + t_{t3}}{2} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (34)$$

$$t_{stř} = \frac{272,1 + 262,1}{2}$$

$$t_{stř} = 267,1 \quad [^{\circ}\text{C}]$$

- stanovení středního tlaku a teploty pro topnou páru vedlejšího svazku:

$$p_{stř} = \frac{p_{t3} + p_{t4}}{2} \quad [\text{Pa}] \quad (35)$$

$$p_{stř} = \frac{5,578 + 4,854}{2}$$

$$p_{stř} = 5,216 \quad [\text{MPa}]$$

$$t_{stř} = \frac{t_{t3} + t_{t4}}{2} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (36)$$

$$t_{stř} = \frac{262,1 + 262,1}{2}$$

$$t_{stř} = 262,1 \quad [^{\circ}\text{C}]$$

- Výpočet střední hodnoty měrného tepelného toku hlavního svazku:

- Volím délku jednoho svazku $l_{sv} = 11 \text{ [m]}$

$$q_{stř,hs} = \frac{Q_{hs,t}}{d_1 \cdot n \cdot \pi \cdot l_{sv}} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (37)$$

$$q_{stř,hs} = \frac{213327000}{0,0134 \cdot 3300 \cdot \pi \cdot 11}$$

$$q_{stř,hs} = 139600 \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}]$$

- Výpočet střední hodnoty měrného tepelného toku vedlejšího svazku:

- Volím délku jednoho svazku $l_{sv} = 11 \text{ [m]}$

$$q_{stř,vs} = \frac{Q_{vs,t}}{d_1 \cdot n \cdot \pi \cdot l_{sv}} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (38)$$

$$q_{stř,vs} = \frac{50193000}{0,0134 \cdot 1000 \cdot \pi \cdot 11}$$

$$q_{stř,vs} = 108392 \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}]$$

- Výpočet Reynoldsova kritéria pro topnou páru hlavního svazku:
 - Dynamická viskozita $\eta = 104,5 \cdot 10^{-6} \text{ [Pa} \cdot \text{s]}$ – tabulková hodnota
 - Výparné teplo $l_v = 1641 \text{ [kJ} \cdot \text{kg]}$ – tabulková hodnota

$$Re_{hs} = \frac{2 \cdot q_{stř,hs} \cdot l_{sv}}{\eta \cdot l_v} \quad [-] \quad (39)$$

$$Re_{hs} = \frac{2 \cdot 139600 \cdot 11}{104,5 \cdot 10^{-6} \cdot 1641000}$$

$$Re_{hs} = 17909 \quad [-]$$

- Výpočet Reynoldsova kritéria pro topnou páru vedlejšího svazku:
 - Dynamická viskozita $\eta = 104,5 \cdot 10^{-6} \text{ [Pa} \cdot \text{s]}$ – tabulková hodnota
 - Výparné teplo $l_v = 1641 \text{ [kJ} \cdot \text{kg]}$ – tabulková hodnota

$$Re_{vs} = \frac{2 \cdot q_{stř,vs} \cdot l_{sv}}{\eta \cdot l_v} \quad [-] \quad (40)$$

$$Re_{vs} = \frac{2 \cdot 108392 \cdot 11}{104,5 \cdot 10^{-6} \cdot 1641000}$$

$$Re_{vs} = 13905 \quad [-]$$

- Výpočet Nusseltova kritéria pro topnou páru hlavního svazku:
 - Určím Prandtlovo kritérium pomocí softwaru EES pro střední teplotu topné páry v hlavním svazku a střední tlak v hlavním svazku. $Pr_{hs} = 0,8347 \text{ [-]}$. Měrný objem v' a v'' jsem si určil, již předem při určování středního měrného objemu (viz rovnice č. (27))

$$Nu_{hs} = 0,14 \cdot Re_{hs}^{0,7} \cdot Pr_{hs}^{0,35} \cdot \left(\frac{v''}{v'} \right)^{0,35} \quad [-] \quad (41)$$

$$Nu_{hs} = 0,14 \cdot 17909^{0,7} \cdot 0,8347^{0,35} \cdot \left(\frac{0,03437}{0,001281} \right)^{0,35}$$

$$Nu_{hs} = 394 \quad [-]$$

- Výpočet Nusseltova kritéria pro topnou páru vedlejšího svazku:

- Určím Prandtlovo kritérium pomocí softwaru EES pro střední teplotu topné páry ve vedlejším svazku a střední tlak ve vedlejším svazku. $Pr_{vs} = 0,832$ [-]. Měrný objem v' a v'' jsem si určil, již předem při určování středního měrného objemu (viz rovnice č. (30))

$$Nu_{vs} = 0,14 \cdot Re_{vs}^{0,7} \cdot Pr_{vs}^{0,35} \cdot \left(\frac{v''}{v'}\right)^{0,35} \quad [-] \quad (42)$$

$$Nu_{vs} = 0,14 \cdot 13905^{0,7} \cdot 0,832^{0,35} \cdot \left(\frac{0,03321}{0,002464}\right)^{0,35}$$

$$Nu_{vs} = 259 \quad [-]$$

- Výpočet součinitele přestupu tepla pro topnou páru hlavního svazku:
 - Určím tepelnou vodivost topné páry pomocí softwaru EES pro střední teplotu topné páry v hlavním svazku a střední tlak v hlavním svazku
 $\lambda_t = 0,6005 \text{ [W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$

$$Nu_{hs} = \frac{\alpha_{1hs} \cdot d_1}{\lambda_t} \quad [-] \quad (43)$$

$$\alpha_{1hs} = \frac{Nu_{hs} \cdot \lambda_t}{d_1} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (44)$$

$$\alpha_{1hs} = \frac{394 \cdot 0,6005}{0,0134}$$

$$\alpha_{1hs} = 17656 \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$$

- Výpočet součinitele přestupu tepla pro topnou páru vedlejšího svazku:
 - Určím tepelnou vodivost topné páry pomocí softwaru EES pro střední teplotu topné páry ve vedlejším svazku a střední tlak ve vedlejším svazku
 $\lambda_t = 0,6071 \text{ [W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$

$$Nu_{vs} = \frac{\alpha_{1vs} \cdot d_1}{\lambda_t} \quad [-] \quad (45)$$

$$\alpha_{1vs} = \frac{Nu_{vs} \cdot \lambda_t}{d_1} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (46)$$

$$\alpha_{1vs} = \frac{259 \cdot 0,6071}{0,0134}$$

$$\alpha_{1vs} = 11734 \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$$

- stanovení středního tlaku a teploty pro přihřívanou páru:

$$p_{stř} = \frac{p_{p1} + p_{p3}}{2} \quad [\text{Pa}] \quad (47)$$

$$p_{stř} = \frac{0,6+0,6}{2}$$

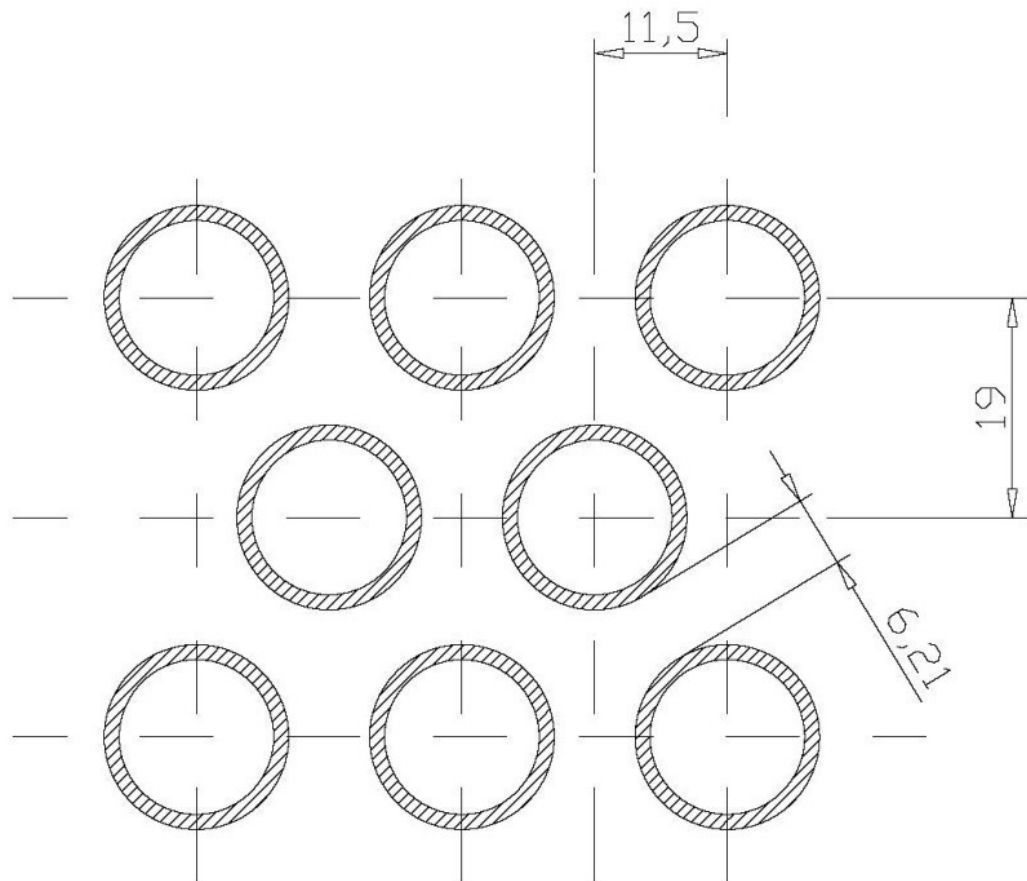
$$p_{stř} = 0,6 \quad [\text{MPa}]$$

$$t_{stř} = \frac{t_{p1}+t_{p3}}{2} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (48)$$

$$t_{stř} = \frac{158,8+260}{2}$$

$$t_{stř} = 209,4 \quad [^{\circ}\text{C}]$$

- výpočet rychlosti přehřívání páry mezi svazky:
 - konstrukční řešení volím podle obr. 8.1 (uspořádání svazku je podle parogenerátoru 3. a 4. Bloku JE Mochovce)



Obr. 8.1. Uspořádání svazku

$$S_1 = 11,5 \text{ [mm]}$$

$$S_2 = 19 \text{ [mm]}$$

$$l_{min} = 6,21 \text{ [mm]}$$

$$n_{sv} = 41 \text{ [-]}$$

- Určím si pomocí softwaru EES z teploty t_{p1} a suchosti X_{p1} měrný objem páry na vstupu do přehříváče, následně podle teploty t_{p3} a suchosti $X_{p3} = X_{p1}$

měrný objem páry na výstupu z přehříváče. Z těchto hodnot určím střední měrný objem $v_{stř} [m^3 \cdot kg^{-1}]$.

$$v_{stř} = 0,1771 \quad [m^3 \cdot kg^{-1}] \quad (49)$$

$$S_{sv} = l_{sv} \cdot l_{min} \cdot n_{sv} \quad [m^2] \quad (50)$$

$$S_{sv} = 11 \cdot 0,00621 \cdot 41$$

$$S_{sv} = 2,8 \quad [m^2]$$

$$w = \frac{m_{p1} \cdot v}{S_{sv}} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (51)$$

$$w = \frac{1080 \cdot 0,1771}{2,8}$$

$$w = 68,31 \quad [m \cdot s^{-1}]$$

- Výpočet Reynoldsova kritéria pro přehřívanou páru:

- Střední kinematická viskozita – tabulková hodnota $\nu = 5,783 \cdot 10^{-6} [m^2 s^{-1}]$

$$Re_p = \frac{w \cdot d_z}{\nu} \quad [-] \quad (52)$$

$$Re_p = \frac{68,31 \cdot 0,016}{5,783 \cdot 10^{-6}}$$

$$Re_p = 188995 \quad [-]$$

- Výpočet Nuseltova kritéria pro přehřívanou páru:

- Určím si pomocí softwaru EES z teploty t_{p1} a suchosti $X=1$ Prandtlovo kritérium páry na vstupu do přehříváče, následně podle teploty t_{p3} a suchosti $X = 1$ Prandtlovo kritérium páry na výstupu z přehříváče. Z těchto hodnot určím střední Prandtlovo kritérium $Pr [-]$.

- $\epsilon_i [-]$ pro první a druhou řadu trubek zanedbávám

- $n; c [-]$ tabulková hodnota

$$\epsilon_s = \left(\frac{2 \cdot S_1}{S_2} \right)^{1/6} \quad [-] \quad (53)$$

$$\epsilon_s = \left(\frac{2 \cdot 11,5}{19} \right)^{1/6}$$

$$\epsilon_s = 1,032 \quad [-]$$

$$Nu_p = c \cdot Re_p^n \cdot Pr^{0,3} \cdot \epsilon_s \cdot \epsilon_i \quad [-] \quad (54)$$

$$Nu_p = 0,41 \cdot 188995^{0,6} \cdot 1,25^{0,3} \cdot 1,032 \cdot 1$$

$$Nu_p = 663 \quad [-]$$

- Výpočet součinitele přestupu tepla pro přihřívanou páru:
 - Určím tepelnou vodivost topné páry pomocí softwaru EES pro střední teplotu přihřívané páry a střední tlak přihřívané páry
 $\lambda_t = 0,03606 \text{ [W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$

$$Nu_p = \frac{\alpha_2 \cdot d_2}{\lambda_{stř}} \quad [-] \quad (55)$$

$$\alpha_2 = \frac{Nu_p \cdot \lambda_{stř}}{d_2} \quad [\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}] \quad (56)$$

$$\alpha_2 = \frac{663 \cdot 0,03606}{0,016}$$

$$\alpha_2 = 1494 \quad [\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$$

- Výpočet součinitele prostupu tepla pro hlavní svazek:

$$k = \frac{\pi}{\frac{1}{d_1 \cdot \alpha_{1hs}} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_M} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot d_2}} \quad [\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}] \quad (57)$$

$$k = \frac{\pi}{\frac{1}{0,0134 \cdot 17656} + \frac{1}{2 \cdot 36} \cdot \ln \frac{0,016}{0,0134} + \frac{1}{0,016 \cdot 1464}}$$

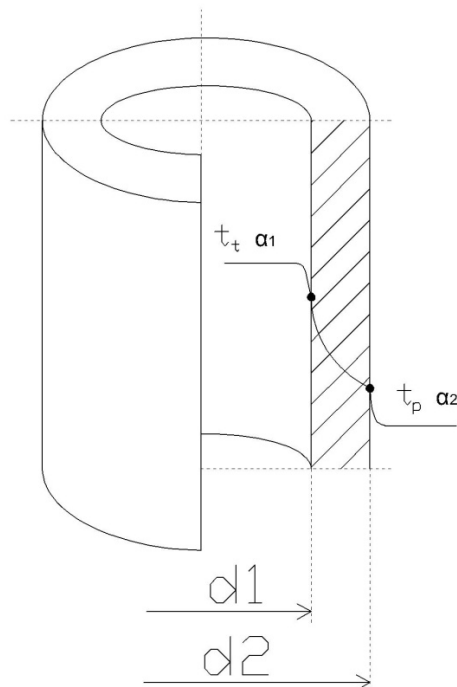
$$k = 64 \quad [\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$$

- Výpočet součinitele prostupu tepla pro vedlejší svazek:

$$k = \frac{\pi}{\frac{1}{d_1 \cdot \alpha_{1vs}} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_M} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot d_2}} \quad [\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}] \quad (58)$$

$$k = \frac{\pi}{\frac{1}{0,0134 \cdot 11734} + \frac{1}{2 \cdot 36} \cdot \ln \frac{0,016}{0,0134} + \frac{1}{0,016 \cdot 1464}}$$

$$k = 61 \quad [\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$$



Obr. 8.2. Přestup tepla válcovou stěnou

Výpočty součinitelů prostupu tepla pro hlavní a vedlejší svazek přes tyto základní vzorce dávají velice nepřesné výsledky. Proto je přepočítám přesnějším vztahem, kde:

- tepelná vodivost materiálu $\lambda_m = 36 \text{ [W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$
- tepelná vodivost vrstvy CaCO_3 $\lambda_{\text{CaCO}_3} = 2,25 \text{ [W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$
- vnitřní průměr trubky po zanesení vrstvou CaCO_3 $d_n = 0,0114 \text{ [m]}$
- součinitel přestupu tepla na straně topné páry [viz 5] $\alpha_t = 10000 \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$

- Výpočet součinitele prostupu tepla pro hlavní svazek:

$$k = \frac{1}{\frac{d_2}{d_n \alpha_t} + \frac{d_1}{2 \lambda_{\text{CaCO}_3}} \ln \frac{d_1}{d_n} + \frac{d_2}{2 \lambda_m} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_{1hs}}} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (59)$$

$$k = \frac{1}{\frac{0,016}{0,0114 \cdot 10000} + \frac{0,0134}{2 \cdot 2,25} \ln \frac{0,0134}{0,0114} + \frac{0,016}{2 \cdot 36} \ln \frac{0,016}{0,0134} + \frac{1}{17656}}$$

$$k = 1393 \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$$

- Výpočet součinitele prostupu tepla pro vedlejší svazek:

$$k = \frac{1}{\frac{d_2}{d_n \alpha_t} + \frac{d_1}{2 \lambda_{\text{CaCO}_3}} \ln \frac{d_1}{d_n} + \frac{d_2}{2 \lambda_m} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_{1vs}}} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (60)$$

$$k = \frac{1}{\frac{0,016}{0,0114 \cdot 10000} + \frac{0,0134}{2 \cdot 2,25} \ln \frac{0,0134}{0,0114} + \frac{0,016}{2 \cdot 36} \ln \frac{0,016}{0,0134} + \frac{1}{11734}}$$

$$k = 1340 \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$$

- Výpočet středního logaritmického rozdílu teplot pro hlavní svazek:

$$\Delta t_{ln,hs} = \frac{(t_{t1} - t_{p2}) - (t_{t1} - t_{p3})}{\ln \frac{t_{t1} - t_{p2}}{t_{t1} - t_{p3}}} \quad [^\circ\text{C}] \quad (61)$$

$$\Delta t_{ln,hs} = \frac{(272,1 - 169,2) - (272,1 - 260)}{\ln \frac{272,1 - 169,2}{272,1 - 260}}$$

$$\Delta t_{ln,hs} = 42 \quad [^{\circ}\text{C}]$$

- Výpočet středního logaritmického rozdílu teplot pro vedlejší svazek:

$$\Delta t_{ln,vs} = \frac{(t_{t3}-t_{p1})-(t_{t3}-t_{p2})}{\ln \frac{t_{t3}-t_{p1}}{t_{t3}-t_{p2}}} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (62)$$

$$\Delta t_{ln,vs} = \frac{(262,1-158,8)-(262,1-169,2)}{\ln \frac{262,1-158,8}{262,1-169,2}}$$

$$\Delta t_{ln,vs} = 98 \quad [^{\circ}\text{C}]$$

- Výpočet velikosti teplosměnné plochy vnějšího povrchu vlásenek pro hlavní svazek:

$$k = \frac{Q_{hs,t}}{S_{hs} \cdot \Delta t_{ln,hs}} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (63)$$

$$S_{hs} = \frac{Q_{hs,t}}{k \cdot \Delta t_{ln,hs}} \quad [\text{m}^2] \quad (64)$$

$$S_{hs} = \frac{213327000}{1393 \cdot 42}$$

$$S_{hs} = 3646 \quad [\text{m}^2]$$

- Výpočet velikosti teplosměnné plochy vnějšího povrchu vlásenek pro vedlejší svazek:

$$k = \frac{Q_{vs,t}}{S_{vs} \cdot \Delta t_{ln,vs}} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (65)$$

$$S_{vs} = \frac{Q_{vs,t}}{k \cdot \Delta t_{ln,vs}} \quad [\text{m}^2] \quad (66)$$

$$S_{vs} = \frac{50193000}{1340 \cdot 98}$$

$$S_{vs} = 382 \quad [\text{m}^2]$$

- Výpočet délky vlásenek pro hlavní svazek:

$$l_{hs} = \frac{S_{hs}}{\pi \cdot d_2} \quad [\text{m}] \quad (67)$$

$$l_{hs} = \frac{3646}{\pi \cdot 0,016}$$

$$l_{hs} = 72535 \quad [\text{m}]$$

- Výpočet délky vlásenek pro vedlejší svazek:

$$l_{vs} = \frac{S_{vs}}{\pi \cdot d_2} \quad [\text{m}] \quad (68)$$

$$l_{vs} = \frac{382}{\pi \cdot 0,016}$$

$$l_{vs} = 7599 \quad [\text{m}]$$

- Výpočet počtu vlásenek pro hlavní svazek:

- Vycházím z toho, že v separátoru-přihříváči páry jsou umístěny celkem 4 přihříváky.

$$z_{hs} = \frac{l_{hs}}{4 \cdot l_{sv}} \quad [\text{ks}] \quad (69)$$

$$z_{hs} = \frac{72535}{4 \cdot 11}$$

$$z_{hs} = 1649 \quad [\text{ks}]$$

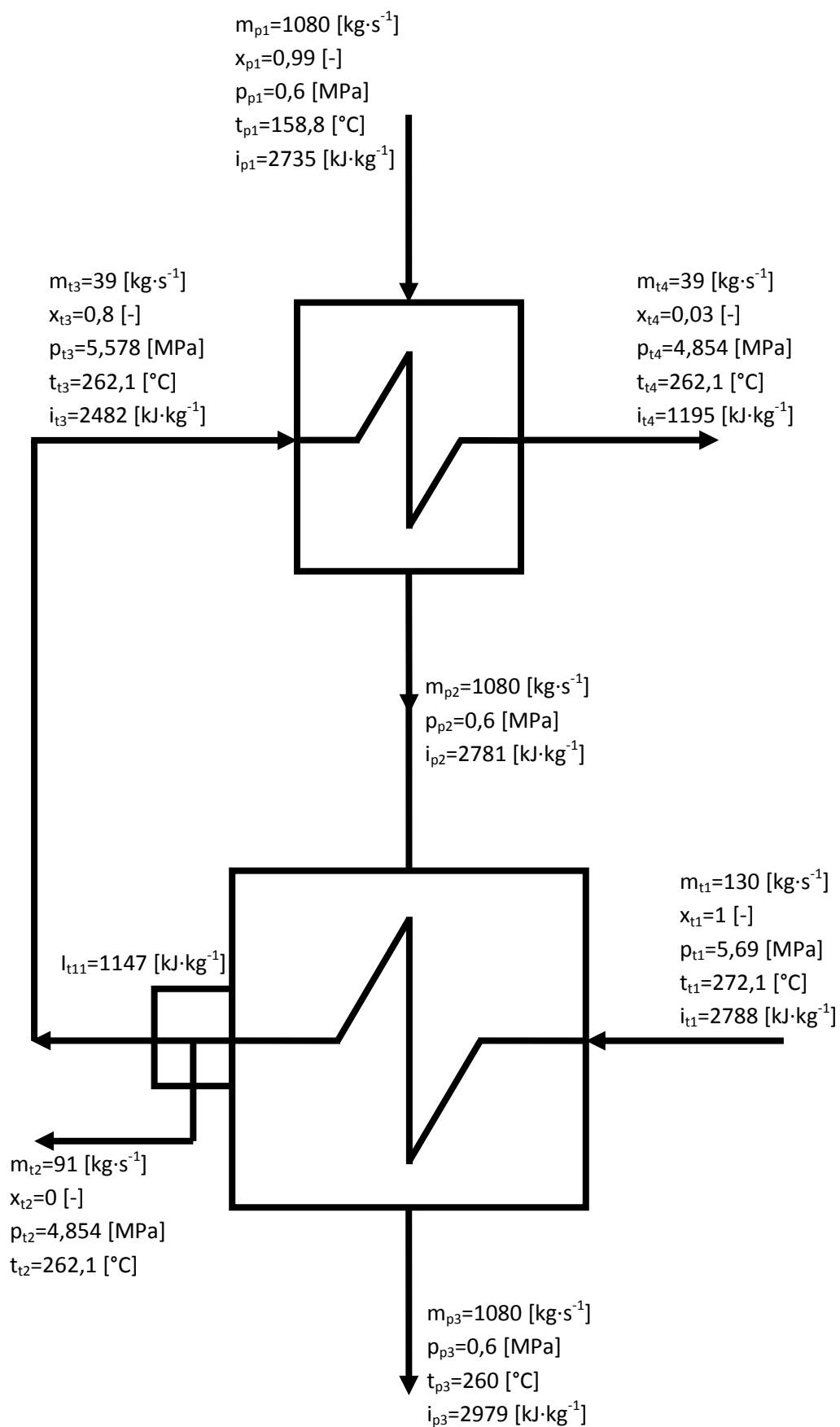
- Výpočet počtu vlásenek pro hlavní svazek:

$$z_{vs} = \frac{l_{vs}}{4 \cdot l_{sv}} \quad [\text{ks}] \quad (70)$$

$$z_{vs} = \frac{7599}{4 \cdot 11}$$

$$z_{vs} = 173 \quad [\text{ks}]$$

8.3. Energetická bilance přehříváku



Obr. 8.3. Energetická bilance přehříváku

8.4. Výpis zdrojového kódu a výsledková tabulka z programu EES

```
Pp[1]=600
Xp[1]=0,99
Tp[1]=Temperature(Steam_IAPWS;P=Pp[1];x=xp[1])
hp[1]=Enthalpy(Steam_IAPWS;x=xp[1];P=Pp[1])
vp[1]=Volume(Steam_IAPWS;T=Tp[1];x=xp[1])
Prp[1]=Prandtl(Steam_IAPWS;T=Tp[1];x=1)
```

```
Pp[2]=600
hp[2]=2781
Tp[2]=Temperature(Steam_IAPWS;P=Pp[2];h=hp[2])
```

```
Pt[1]=5690
Xt[1]=1
Tt[1]=Temperature(Steam_IAPWS;P=Pt[1];x=xt[1])
ht[1]=Enthalpy(Steam_IAPWS;x=xt[1];P=Pt[1])
vt[1]=Volume(Steam_IAPWS;T=Tt[1];x=xt[1])
```

```
Tt[2]=262,1
Xt[2]=0
Pt[2]=Pressure(Steam_IAPWS;T=Tt[2];x=xt[2])
vt[2]=Volume(Steam_IAPWS;T=Tt[2];x=xt[2])
```

```
tp[3]=260
Pp[3]=600
Xp[3]=0,99
hp[3]=Enthalpy(Steam_IAPWS;T=Tp[3];P=Pp[3])
vp[3]=Volume(Steam_IAPWS;T=Tp[3];x=xp[3])
Prp[3]=Prandtl(Steam_IAPWS;T=Tp[3];x=1)
```

```
Tt[4]=262,1
Xt[4]=0,03
ht[4]=Enthalpy(Steam_IAPWS;T=Tt[4];x=xt[4])
vt[4]=Volume(Steam_IAPWS;T=Tt[4];x=xt[4])
```

```
Tt[3]=262,1
Xt[3]=0,81
ht[3]=Enthalpy(Steam_IAPWS;T=Tt[3];x=xt[3])
vt[3]=Volume(Steam_IAPWS;T=Tt[3];x=xt[3])
```

```
Tst[1]=267,1
Pst[1]=5634
```


$Pr[1]=Prandtl(Steam_IAPWS;T=Tst[1];P=Pst[1])$

$Tst[2]=262,1$

$Pst[2]=5216$

$Pr[2]=Prandtl(Steam_IAPWS;T=Tst[2];P=Pst[2])$

$Tstp[1]=209,4$

$Pstp[1]=600$

$k[1]=Conductivity(Steam_IAPWS;T=Tstp[1];P=Pstp[1])$

Tabulka č.1. Výsledky z programu EES

EES Arrays Table						
Sort	¹ P_{p_i} [kPa]	² P_{t_i} [kPa]	³ T_{p_i} [°C]	⁴ T_{t_i} [°C]	⁵ X_{p_i} [-]	⁶ X_{t_i} [-]
[1]	600	5690	158,8	272,1	0,99	1
[2]	600	4854	169,2	262,1		0
[3]	600		260	262,1	0,99	0,81
[4]				262,1		0,03

⁷ h_{p_i} [kJ/kg]	⁸ h_{t_i} [kJ/kg]	⁹ v_{t_i} [m ³ /kg]	¹⁰ Pr_i [-]	¹¹ T_{st_i} [°C]	¹² P_{st_i} [kPa]
2735	2788	0,03437	0,8347	267,1	5634
2781		0,001281	0,832	262,1	5216
2979	2482	0,03321			
	1195	0,002464			

¹³ vp_i [m ³ /kg]	¹⁴ Pr_{p_i} [-]	¹⁵ P_{stp_i} [kPa]	¹⁶ T_{stp_i} [°C]	¹⁷ k_i [W/(m*K)]
0,3125	1,075	600	209,4	0,03606
0,04177	1,425			

9. Závěr

Tato bakalářská práce se zabývala separátorem a přehřívčem pro jadernou elektrárnu s tlakovodním reaktorem typu MIR 1200. Mým úkolem bylo ze zadaných vstupních parametrů pro toto zařízení vypočítat počet vlásenek přehříváku.

Pomocí rovnic pro sdílení tepla jsem určil součinitele prostupu tepla, ze kterého následně vyšla plocha vnějšího povrchu vlásenek přehříváku. Nejprve jsem použil zjednodušený vztah, kde mi ovšem hodnota vyšla nereálná. Poté jsem využil přesnějšího vztahu a celý výpočet přepočítal.

V literatuře jsem se dočetl, že přehřívák se skládá vždy ze dvou svazků – hlavního a vedlejšího, proto jsem i já počítal s oběma svazky. Dopočetl jsem se k počtu 1649 vlásenek pro hlavní svazek přehříváku a 173 vlásenek pro vedlejší svazek přehříváku.

Během celého výpočtu jsem počítal s několika zjednodušeními, proto výsledek nemusí úplně odpovídat realitě.

10. Seznam použité literatury

Literatura:

- [1] HEJZLAR, R: Stroje a zařízení jaderných elektráren. Díl 1. a 2. Vydavatelství ČVUT v Praze. 2005. ISBN 80-01-030190-X
- [2] HEZOUČKÝ, F: Základy teorie provozních režimů jaderných elektráren s tlakovodními reaktory. Vydavatelství ČVUT v Praze. 2005. ISBN 80-01-03324-4.
- [3] ZVARA, J: Separátory a přehřívače pary pro jadrové elektrárne. Vydavatelství SVŠT v Bratislave. 1976.
- [4] KADLEC, Z: Průvodce sdílením tepla pro požární specialisty. Vydavatelství SPBI v Ostravě. 2009. ISBN 978-80-7385-061-6
- [5] KULDÁSEK, K. Návrh separátoru a přehřívače páry pro turbínu 1000 MWe tlakovodní jaderné elektrárny. Ostrava, 2008. 37 s. Diplomová práce. VŠB Ostrava.

Internetové zdroje:

- [6] *Skoda-js.cz* [online]. c2009 [cit. 2011-04-07]. Jsme připraveni na jadernou renesanci. Dostupné z WWW:
<<http://www.skoda-js.cz/cs/mir-1200/index.shtml>>
- [7] KOHOUT, Milan. *Http://ivd.cz.artbox.cust.ignum.cz* [online]. 22. 06. 2010 [cit. 2011-04-07]. MIR-1200. Dostupné z WWW:
<http://ivd.cz.artbox.cust.ignum.cz/download/Milan_Kohout.pdf>
- [8] *Gidropress.podolsk.ru* [online]. c2010 [cit. 2011-04-07]. Modernized International Reactor. Dostupné z WWW:
<http://www.gidropress.podolsk.ru/files/projects/2010/mir_eng.pdf>.
- [9] ZDEBOR, Roman. *Allforpower.cz* [online]. 01/2010 [cit. 2011-04-07]. MIR-1200, projekt nejen pro Českou republiku. Dostupné z WWW:
<<http://www.allforpower.cz/UserFiles/files/2009/skodaJS.pdf>>

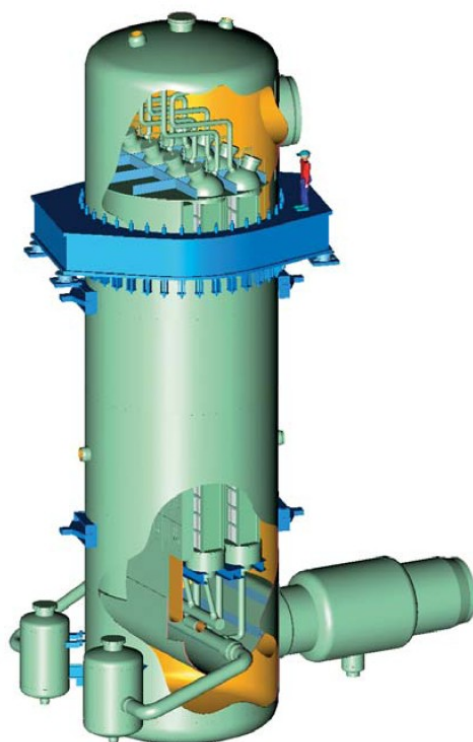
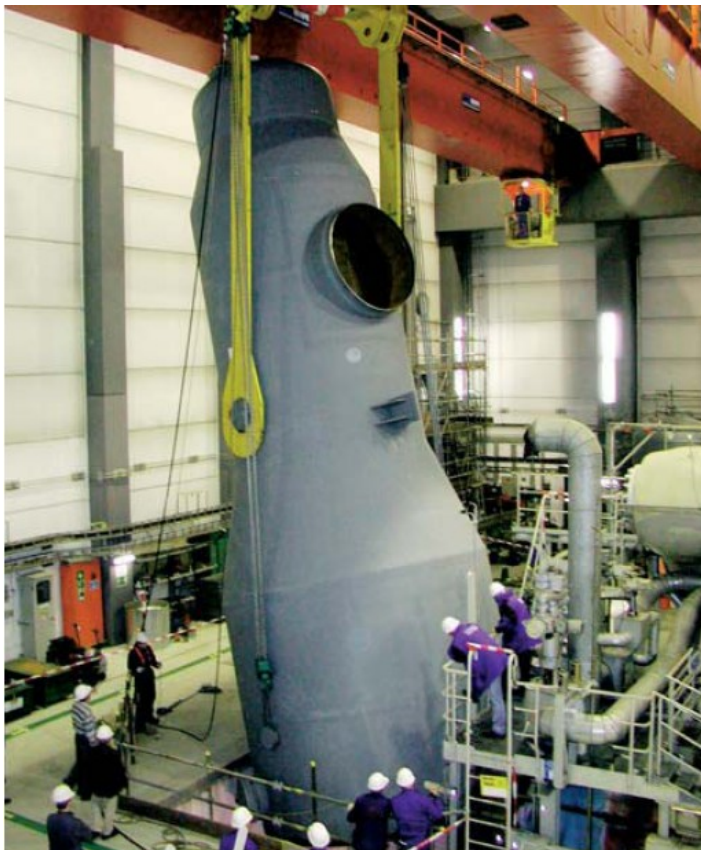
11. Seznam příloh

- **Obrázková příloha**
- **Schéma SPP 1200** (dokument bc1.dwg)

Obrázková příloha

Všechny materiály pro obrázkovou přílohu byly získány od p. prof. Kolata

- Vertikální separátory a přehřívače



- Horiuontální separátory a přehřívače



